

**三次元環境を移動可能な多脚型ロボット：
SHINAYAKA-L VI：柔軟性の三次元化による行動可
能な範囲の拡大**

著者	阿曾 友斗
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-6
発行年	2020-03-24
URL	http://doi.org/10.15002/00022810

三次元環境を移動可能な多脚型ロボット:SHINAYAKA-L VI ～柔軟性の三次元化による行動可能な範囲の拡大～

MULTI-LEGGED ROBOT FOR 3-DIMENSIONAL ENVIRONMENT :SHINAYAKA-L VI
～EXPANDING THE DRIVING ENVIRONMENT THROUGH 3-DIMENSIONAL FLEXIBILITY～

阿曾友斗

Yuto ASO

指導教員 伊藤一之

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

Robots that operate in real complex situations, such as rescue missions, maintenance and inspections of infrastructure, have attracted considerable attention. However, it is difficult to control multi-legged robots in real time because large amounts of information must be processed for them to move, involving a considerable computational cost. In this research, we propose switching mechanism that can vary the stiffness of the leg and improve our previous multi-legged robot for irregular ground and narrow space. Further, we developed a prototype robot and conducted experiments; this robot was demonstrated to move on different terrains.

Key Words : Centipede, flexibility, multi-legged robot, rough terrain

1. はじめに

近年, 日本では大地震等による家屋の倒壊や, 二次災害などの危険があり, 人の侵入が困難である危険箇所での保守点検や要救助者の探索などに利用するロボットが注目を集めている[1-13]. これらのロボットは危険箇所での作業を行う場合のリスク等を想定すると非常に有用であると考えられる. 従来開発されてきた移動ロボットは, クローラー型ロボットやマニピレータ型ロボット, 多脚型ロボットなどに分類することができる[6-13]. クローラー型ロボットは走破性能に優れ, 従来のレスキューロボットとして災害現場で採用されていた. クローラー型ロボットの場合, 砂地などでは空転し, 草地などでは草がクローラーに絡まってしまいロックされてしまうなどの問題点がある. 次にマニピレータ型ロボットは狭小空間を移動することが可能であり, 瓦礫環境内での探索等の活躍が見込まれている. しかし様々な環境を走破することは難しくなっている. 多脚型ロボットは走破性能を有し, 脚部を使用して走行以外のタスクを完了することができる. しかし, 一般的に上記のような複雑な環境下でロボットを動作させようとする制御が非常に困難になるという問題があげられる. なぜなら今挙げたような三種類のロボットは多くの自由度を持つ関節を有し, 複雑な環境で動作させるために環境を測定するためのセンサを持たなければならないからである. その結果ロボットを動作させ制御するためには情

報の計算量が多くなり, 実時間処理が困難になってしまう.

一方, 昆虫のような脳の小さい下等な生物であっても複雑な自然界においてうまく機能し, 巧みに存在している. ここで我々は昆虫であるムカデに着目した. ムカデは地面の凹凸に対して, 柔軟な胴体と脚が適応することによって, 一定の周期で多数の脚を動作させるだけでも関わらず, 自然界の様々な未知環境に適応し, 歩行することが可能であるという特性がある. このムカデの持つ柔軟性が複雑な制御をせずに, 複雑な環境に受動的に適応することが可能であると考えられる. このことから, 目的とする複雑な環境下での動作が可能なロボットを開発するためには実環境の特性を利用して制御可能な機体の設計であることがわかる. その特性をロボットに取り込むことで, 多くの自由度を持つ関節を制御する負担を少なくすることができ, それに伴い実時間処理が可能になると考えられる. 我々はこのような柔軟な構造を持つ様々なロボットを開発してきた[14-16]. 本研究では多脚型ロボットにおける課題点を解決しマニピレータ型ロボットが持つ狭小空間への侵入能力を加えた従来研究を進展させ, 一定の歩行パターンを繰り返すだけで段差の昇降や, 溝, 不整地等の走行を可能にする多脚ロボットを開発することを目的とする.

2. 従来研究

(1) 瓦礫環境における多脚型ロボット

一般的に多脚型ロボットは瓦礫環境での移動に優れており、地震などの大規模な災害における救助作業に利用することが可能ではないかと期待されている[11-13]。多脚型ロボットは多脚であるがゆえに制御する箇所が多くなっている。一般的に多脚型ロボットを動作させるには、環境に応じて全ての脚や胴体を制御しなくてはならない。また瓦礫環境を動作させる際には、瓦礫一つ一つの位置等の情報を得なければならないため、多くのセンサを必要とする。それゆえに計算量が多くなるため実時間での処理が追い付かず制御が困難になる。この問題は一刻を争うような災害現場の救助活動現場では致命的の問題となる。常に状況が変化する瓦礫環境のような未知環境では、通常の探索活動や既知環境よりも計算量が飛躍的に増加し制御や操作が複雑になり、初めてロボットを操作する人には扱いづらいものになってしまう。これらの問題点を解決するために我々の研究では柔軟な胴体と脚の関節を有する多脚型ロボットを開発してきた[15-16]。従来機体を下に示す。



図 1 SHINAYAKA-L V

(2) 従来機体の問題点

従来の機体は脚部と胴体機構の両方に柔軟性を持っている。それゆえに障害物を受動的に回避することが可能であるが脚部の柔軟性を有する方向が 1 方向であるため行動範囲が制限されてしまう。この機構では前後方向への柔軟性は有しているため、前後方向には推進と受動的な障害物回避を同時に行うことが可能であるが、その他の方向への柔軟性を有していないため、実環境に適應することが不可能と思われる状況が発生する。本研究では脚部の柔軟性を三次元的に発揮可能な関節を開発し、胴体機構を改良することで従来機体より、行動範囲を拡大することが可能な機構の提案をする。

3. 提案手法

脚部の柔軟性と剛性を受動的に切り替えることが可能

な機構を提案する。脚部は地面に接地した際、自重を支えることが可能な高い剛性を必要とする。またロボットの脚部が走行中に障害物に衝突した場合、障害物からの反力を利用して受動的に障害物を回避するためには脚部の関節は柔軟であることが要求される。

図 2 に提案するロボット全体の概要を示す。2 本の脚で 1 ユニットとなっている。また脚部の構造や胴体機構は全て同じ機構で作製されている。図 3 に示すようにそれぞれのユニットには二つのサーボモーターが搭載されている。一つは機体を立ち上げらせるために脚部を垂直方向に動作させるサーボモーターである。もう一つのサーボモーターは脚部が地面に接地している際、地面を蹴りロボットに推進力を与える水平方向に動作させるサーボモーターである。



図 2 開発したロボット

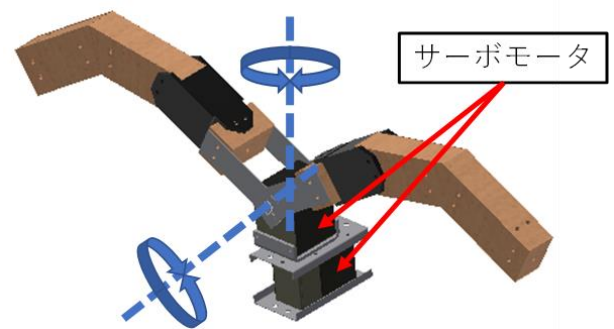


図 3 提案するロボットの 1 ユニット

(1) 脚部の提案機構

脚部は地面に接地した際、地面を蹴りロボットが推進力を得ることが可能な剛性を必要とする。地面に接地していない状態では遊脚し障害物を受動的に回避する柔軟性を切り替えることが可能な脚部の実現を目的とする。受動的に脚部の柔軟性と剛性を切り替えることが可能な関節として楔形状の関節を提案する。脚部が地面に接地した際、地面からの反力によって楔形状の脚部関節が嵌まり剛性を得るような機構にする。提案する脚部関節機構の詳細を図 4 に示す。従来の楔形状関節は二次元平面状の動作のみであったが、図 4 に示すような楔形状の関

節を採用することによって三次元的に動作することが可能である。従来の楔形状関節は前後方向に柔軟性を有していたが、新たに提案する楔形状関節は前後方向のみならず三次元的に柔軟性を発揮することが可能である。また提案する四角錐の形状を模した楔は二次元平面上で考えると図 5 に示すような関係が成り立つ。図 5 から次のような関係式が成り立つ。外部から受ける力を F とする。すると楔が外れない条件は

$$F' \sin \theta < \mu F' \cos \theta \quad (1)$$

を満たせばよい。これを μ について整理すると次のような式が出る。

$$\mu > \tan \theta \quad (2)$$

となる。楔の角度の正接が材質の摩擦係数以下であることが条件となる。この条件が満たされれば今回提案する楔形状の関節が剛性を得ることが可能である。本研究で提案する楔形状関節の材料である ABS 樹脂の摩擦係数 $\mu=0.57$ である。この値を上記の式に代入すると $\theta > 29.68^\circ$ であればよい。よって今回提案する楔形状関節の四角錐の角度を 30° と設計した。図 6 に示すように脚部は提案する脚部関節である二つのブロック、シリコン製のシートと木材からなる剛性パーツに分類される。シリコン製のシートが楔形状の関節が嵌まる際、撓むような長さで設計されている。シリコン製のシートが撓むことによって、関節が抜けようとする方向に力がかかる。よって脚が地面からの反力を受けない状態では楔形状の関節は遊脚状態になり二つのブロックの間に隙間が生じる。図 7 に示すように、二つのブロックの間に隙間が生じることによって外部から力が加わった際、柔軟性を発揮する機構になっている。またシリコン製のシートは伸ばすと弾性力が働くため、提案機構が柔軟性を発揮した際に、元の位置に戻す役割も担っている。

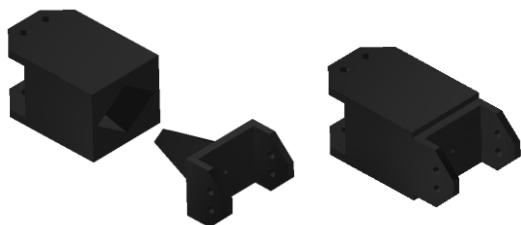


図 4 脚部関節機構

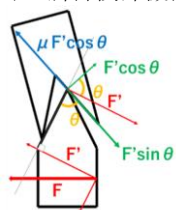


図 5 楔の関係図

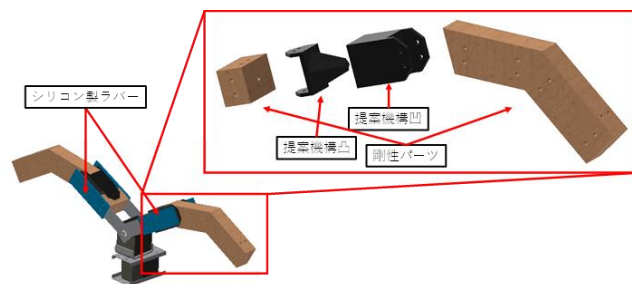


図 6 脚部の詳細

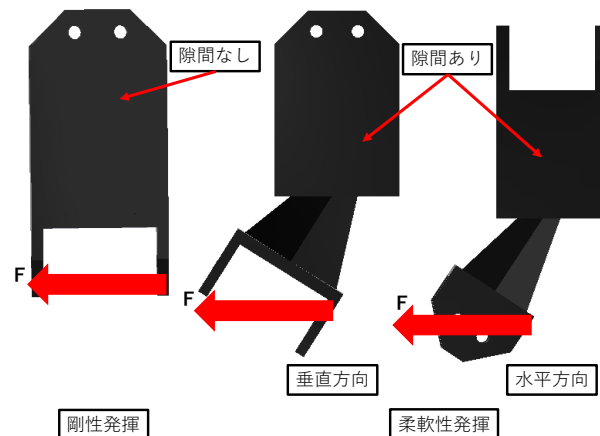


図 7 楔の状態場合分け

(2) 胴体関節の構造

様々な環境に適応するためには、各ユニットを接続する胴体関節にも柔軟性が必要とされる。従来のロボットの胴体関節機構ではジャバラホースのみを単体で使用していた。ジャバラホースは柔軟性に富んでいるという特性がある。しかしジャバラホース単体では強度が低く、脚で地面を蹴って得た推進力をうまくロボット全体に伝えられないという問題が生じていた。さらにジャバラホースは捻じれに強い特性を持っているが、この特性も単体では強度に欠け、脚部が立とうと地面を蹴る際のモーメントで捻じれてしまい推進力を伝えられないという問題が生じていた。これらの問題を解決するために本研究では図 8 にジャバラホースの内部に木材を斜めに切断したブロックを挿入する。胴体関節の構造を図 8 に示す。これにより従来のジャバラホースのみと同じ体積で剛性を確保することが可能となる。木材を斜めに切断することで、上下左右には柔軟性を残したまま捻じれる方向への強度を確保することが可能となる。またロボットの接続部の凹凸を解消するために円形のジャバラホースをロボット全体のカバーとしている。この円形のジャバラホースの内部に配線を入れることによって外部の障害物から配線を守るカバーとしての役割も担う。

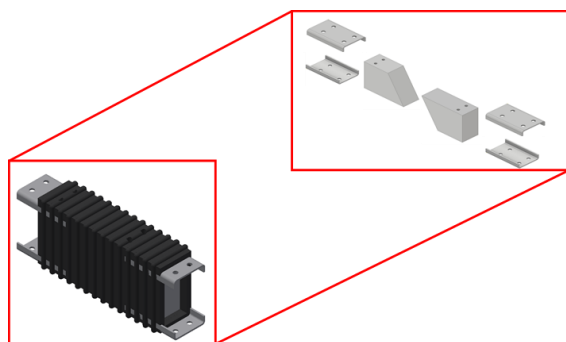


図 8 胴体関節の詳細

(3) 開発した機体

提案した脚部関節と胴体関節の有用性を確認するため、プロトタイプを作製した。開発したロボットを図 9 に示す。またロボットの仕様を表 1 に示す。脚部の剛性パーツは胴体を支える自重でひずみが生じると、力の損失になるため剛性の高い形状でなくてはならない。今回は剛性と質量の観点からホワイットウッドという木材を採用した。また脚部の関節が湾曲する様子を図 10 と図 11 に示す。図 9 に示すように機体が左右に柔軟に湾曲しているため提案した胴体機構の左右方向への柔軟性は確保できているといえる。図 10,11 に示すように脚部の関節が湾曲し柔軟性を確保できていることがわかる。前後方向へは約 55° 、上下方向には約 50° 湾曲することが可能である。前後方向に約 55° 湾曲することによって機体幅を約 60% まで縮小することが可能となる。

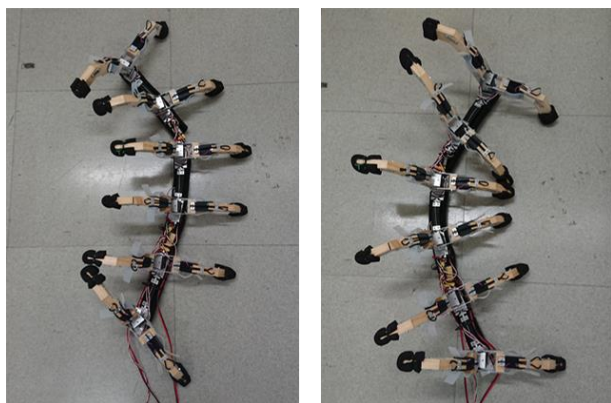


図 9 作製したロボット

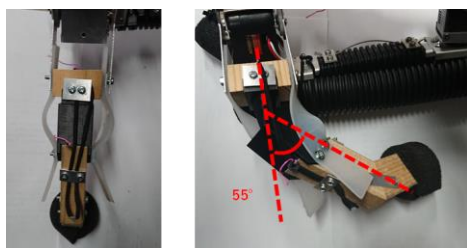


図 10 脚部前後湾曲時



図 11 脚部上下湾曲時

表 1 機体の仕様

機体	長さ	850[mm]
	幅	430[mm]
	高さ	320[mm]
	重量	2.8[kg]

4. 実験結果

提案したロボットの有効性を実証するために、プロトタイプを開発し、以下に示す実験を行いました。

(1) 脚部の剛性と柔軟性の切り替え

実際に開発した提案機構が十分に性能を発揮しているかを確認するための動作確認を行った。脚部が接地している状態と接地していない状態でデジタルスケールを使用し実際の値を測定した。測定した結果を図 12,13 に示す。遊脚時と接地した状態を比較すると遊脚時には前後方向に湾曲する際に必要な力は $0.13[\text{kgf}]$ であった。また下方向に湾曲する際に必要な力は $0.09[\text{kgf}]$ であった。それに対し脚部が地面に接地しているときは約 20 倍の $2.57[\text{kgf}]$ で引いても剛性を保っていた。機体の重量と全体の脚部の本数を考慮すると歩行に対して十分な剛性を持っていると確認できる。これらの結果から脚部の柔軟性と剛性を地面からの反力によって受動的に切り替えることが可能であると確認することができた。

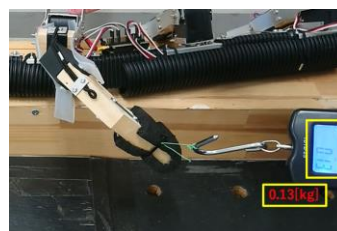


図 12 前後方向への柔軟性

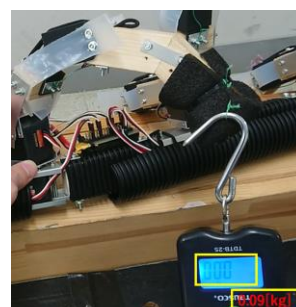


図 13 下方向への柔軟性

(2) 歩行パターン

各ユニットのサーボモーターには一定のパターンの信

号を送信し動作させる。一つ後ろのユニットには位相を1/4周期遅らせた信号を送信する。歩行パターンの確認を行った。図14に示すように後ろユニットは前方のユニットより1/4周期遅れて動作しているのがわかる。またお互いの脚部は干渉せず動作することが確認できた。以後の実験は全てこの歩行パターンを使用して行う。

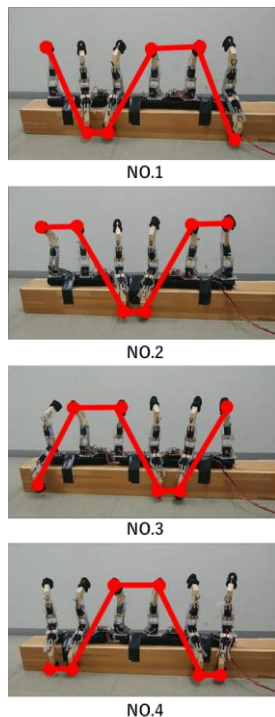


図14 歩行パターン

(3) 狭小空間(幅)

次に脚部に柔軟性を持たせる有用性について実験を行った。機体の幅である43[cm]よりも狭い30[cm]の空間を用意して実験を行った。図15に実験結果を示す。

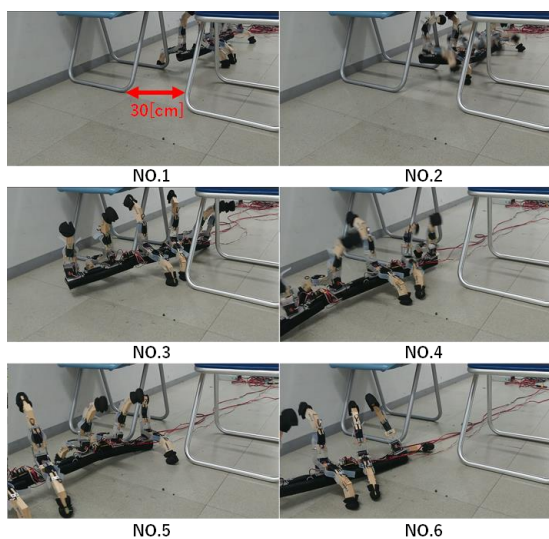


図15 狭小空間走破実験(幅)

(4) 狭小空間(高さ)

次に脚部に三次元的な柔軟性を持たせる有用性につ

いて実験を行った。機体の高さである32[cm]よりも低い21[cm]の空間を用意して実験を行った。図16に実験結果を示す。

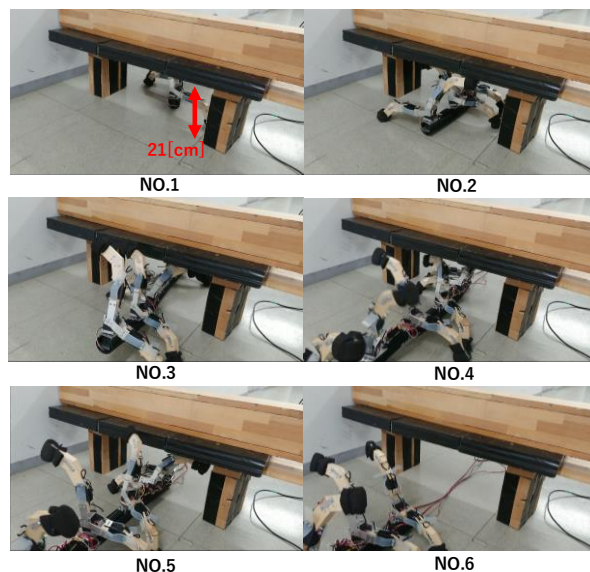


図16 狭小空間走破実験(高さ)

(5) 瓦礫環境

次に環境に対して受動的に脚部の特性を利用可能であるかを確認するため瓦礫環境実験を行った。今回も環境に合わせた特別な制御をせず一定の歩行パターンを繰り返すのみであるとする。瓦礫には大小様々な木片を使用した。図17に実験結果を示す。

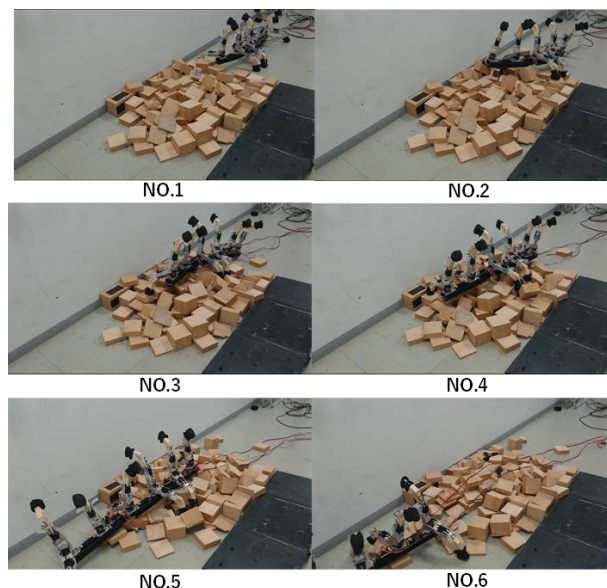


図17 礫環境走破実験

5. 結論

本研究では救助ロボットやインフラ用検査ロボットなど不整地のような、既知環境ではなく未知環境で動作す

るロボットに着目した。これらのロボットが持つ多くの自由度を実時間で制御しなくてはならないという問題に取り組んだ。この問題を解決するために、脚の柔軟性と剛性を受動的に切り替えることが可能な提案機構を搭載したプロトタイプを開発した。そのプロトタイプを使用し検証実験を行った。実験環境として様々な環境を用意し実験を行った。脚部や胴体関節が受動的に環境に適応し走破することが可能であった。今後はより実際の災害現場を想定し、耐久性や防水、防塵性を取り入れることで有用性を証明していきたいと考える。

謝辞：最後に、本研究に際して多大なる御指導、御協力をいただきました法政大学理工学部伊藤一之教授、また知能ロボット研究室の方々に心から感謝いたします。今後の皆様の御健闘を願うとともに、法政大学における各研究において本論文がほんのわずかながらでも参考になればと願うものであります。

参考文献

- 1) F. Matsuno and Y. Uo, "Current trends in research and development of rescue robot systems," *Journal of The Institute of Electrical Engineers of Japan*, vol. 129, no. 4, pp. 232–236, 2009.
- 2) R. R. Murphy, "International cooperation in deploying robots for disasters: Lessons for the future from the Great East Japan Earthquake," *Journal of the Robotics Society of Japan* vol. 32, no. 2, pp. 104–109, 2014.
- 3) S. Tadokoro, "Technical challenge of rescue robotics," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 28, no. 2, pp. 134–137, 2010.
- 4) R. Murphy, "Marsupial and shape-shifting robots for urban search and rescue", *Intelligent Systems and Their Applications*, IEEE, INTELLIGENT SYSTEMS, pp. 14–19, 2000.
- 5) J. Tanaka, K. Suzumori, M. Tanaka, T. Kanda, and M. Mori, "A Mobile Jack Robot for Rescue Operation" *Proceedings of IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, 99–104, 2005.
- 6) K. Lipkin, I. Brown, A. Peck, H. Choset, J. Rembisz, P. Gianfortoni, A. Naaktgeboren, "Differentiable and piecewise differentiable gaits for snake robots", *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1864–1869, 2007.
- 7) M. Arai, T. Takayama, S. Hirose, Development of Souryu-III: Connected Crawler Vehicle for Inspection inside Narrow and Winding Spaces, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, Vol. 1, 52–57, 2004.
- 8) A. Kamimura, H. Kurokawa, "High-step climbing by a crawler robot DIR2 - realization of automatic climbing motion -", *Intelligent Robots and 43 Systems*, 2009. IROS 2009. IEEE/RSJ International Conference on, 618 – 624, 2009.
- 9) H. Miyanaka, N. Wada, T. Kamegawa, N. Sato, S. Tsukui, H. Igarashi, F. Matsuno, "Development of an unit type robot [KOHGA2] with stuck avoidance ability", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3877–3882, 2007.
- 10) E. Rohmer, K. Ohno, T. Yoshida, K. Nagatani, E. Konayagi, S. Tadokoro, "Integration of a sub-crawlers' autonomous control in Quince highly mobile rescue robot", 2010 IEEE/SICE International Symposium on, System Integration (SII), 78–83, 2010.
- 11) K. Nishigai, K. Ito, "Control of multi-legged robot using reinforcement learning with body image and application to a real robot", 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2511 – 2516, 2011.
- 12) P. Birkmeyer, K. Peterson, R. S. Fearing, "DASH: A dynamic 16g hexapedal robot", *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2683–2689, 2009.
- 13) D. Miaki, Y. Murakami, "Development of a multi-leg type micro rescue robot for disaster victim search", *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 1801–1806, 2011.
- 14) H. Maruyama and K. Ito, "Semi-autonomous snake-like robot for search and rescue," *Advanced Robotics*, vol. 30, issue 7, pp. 489–503, 2016.
- 15) M. Masuda and K. Ito, "Semi-autonomous centipede-like robot with flexible legs," *Proc. of IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics 2014 (SSRR2014)*, October 27–30, 2014, Hokkaido Japan.
- 16) K. Aihara and K. Ito, "Adaptive switching mechanism of leg stiffness for multi-legged robot" *Proceeding of IEEE International conference on International Electrical Engineering Congress 2018 (IEECON2018)*, March 7–9, 2018, Krabi THAILAND.